

# El movimiento en la ejecución de recalces con inyección armada. Análisis de tres casos con movimientos previos

*Which is movement in underpinning execution with reinforced injection. Analysis of three cases with previous movements*

F. da Casa<sup>(\*)</sup>, E. Echeverría<sup>(\*)</sup>, F. Celis<sup>(\*)</sup>

## RESUMEN

En la intervención en la cimentación de una edificación se pueden producir movimientos en la estructura sobre rasante, más en los casos en los que el edificio ya sufre un movimiento previo, normalmente de carácter patológico. En el presente trabajo se estudia el resultado del estudio realizado en la aplicación de una técnica concreta de intervención: las inyecciones armadas. Como muestra se presenta el análisis de tres casos en los que se ha intervenido en su cimentación mediante esta técnica, y con la premisa que los tres sufrían movimientos continuados por un largo periodo de tiempo previo. El análisis parte del seguimiento de los movimientos dados en el control realizado en la ejecución del recalce de cada edificio, unificando los criterios de análisis, para luego realizar la comparación entre los resultados. Como principal conclusión, se obtiene que los edificios responden de un modo similar ante la actuación ejecutada en ellos pudiendo por tanto considerarse tal comportamiento como la respuesta "normal" del sistema de tratamiento de terreno en estos casos.

483-9

**Palabras clave:** Recalce; inyección armada; movimientos de edificios.

## SUMMARY

We can produce movements in a structure when we have an intervention in its foundation. This movement is higher if the building has a previous movement if it is cause for degree and pathologic causes. In this paper we study the results of the analysis in the application of a technique of intervention in the foundation of an existing building. The technique for underpinning is by reinforced grouting. We present three histories cases over buildings that have previously differential settlements of pathological origin for a prolonged period of time. Its underpinning was with this technique. The study is based on knowledge of the movements are obtained by controlling the application of underpinning of each of the three examples. We have unified the criteria used for analysis to compare the results. The main conclusion is that the 3 buildings used in the study respond similarly to the actions executed. Therefore, we consider this behaviour as the normal response of the soil in these cases.

**Keywords:** Underpinning; reinforced grouting; movements of building.

<sup>(\*)</sup> Universidad de Alcalá de Henares, Madrid (España).

Persona de contacto/Corresponding author: fernando.casa@uah.es (F. da Casa)

## **1. INTRODUCCIÓN. PUNTO DE PARTIDA**

Los edificios sufren movimientos, más o menos continuos, y progresivos, producidos por diferentes causas, cada caso debe ser considerado como único por la gran cantidad de variables que implica su imposibilidad de agrupar, generalizar, tipificar y por tanto modelizarlos.

En estos casos, la intervención en la cimentación es más compleja, y se hace necesario aplicar una metodología adecuada para subsanar dichos problemas, como las presentadas en diversos congresos y publicaciones, tanto sobre metodologías genéricas (1) (2) como sobre intervenciones, en cimentaciones (3) (4) (5).

Son muchas las técnicas que se pueden utilizar, cada una con su campo de aplicación, su proceso de ejecución, su problemática particular, y su comportamiento propio en relación con la estructura y el modo de interactuar en el proceso de interrupción del movimiento inicial del edificio, finalidad última de la intervención.

No se puede generalizar en ningún caso, ni aplicaciones, ni inconvenientes, siendo además dicha tendencia un error, tanto para el caso del campo de aplicación, como para la técnica ejecutada, ya que tal generalización produce un alto número de fracasos al no resolver los problemas para los que se aplican.

Así mismo también se puede considerar un error el aplicar solamente aquellas técnicas que "son conocidas", ya que podrían no resolver el problema sino generar nuevos problemas derivados de su ejecución e interacción con la edificación y acrecentar su problemática inicial. Es importante conocer e investigar desde el punto de vista del técnico tanto las técnicas como sus procesos de ejecución, de modo que las soluciones a adoptar sean "innovadoras" y surjan del análisis de la necesidad y del "razonamiento" (6).

## **2. LA NECESIDAD DE ESTUDIOS COMO FUENTE DE CONOCIMIENTO**

El estudio de este tipo de comportamientos en cada una de las técnicas es importante como fuente de conocimiento, y como punto fundamental en la aplicación de cada técnica (7) (8) (9), ya que el campo de los recalces, dispone de un reducido campo normativo (meras referencias genéricas), y es necesario analizar los procesos de ejecución, sus particularidades y problemáticas, factores que aportan datos de gran aplicabilidad.

Hay que reconocer que este tipo de investigación parte con un handicap importante, y es la dificultad de acceder a la información necesaria para poder realizar un verdadero estudio investigador. La mayoría de las ocasiones la información está en manos de las empresas ejecutantes de cada sistema, con un cierto "secretismo" para evitar la crítica a sus ejecuciones, o la copia con efectos comerciales. En otros casos no se realizan todos los estudios necesarios, como el control altimétrico de los puntos tratados de forma sistematizada, por ser un incremento del coste considerado innecesario.

## **3. PRESENTACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN REALIZADA**

Siguiendo estas premisas y filosofía de aprendizaje, y teniendo la oportunidad para ello, se plantea aplicar el proceso investigador en varios edificios en los que problemas de carácter patológico han obligado a intervenir en su cimentación mediante la técnica de inyecciones armadas. En estas intervenciones se ha realizado un exhaustivo seguimiento del proceso de ejecución, así como de los movimientos sufridos por el edificio, tanto previos como durante y posteriores a la ejecución. Siendo este el principal objetivo de este trabajo.

Se presentan tres casos, de los diversos edificios estudiados, de los cuales, en los dos primeros edificios se trata de propiedades particulares, cuyo seguimiento ha sido realizado por equipos, de la E.U. de Arquitectura Técnica del campus de Guadalajara de la Universidad de Alcalá, con una cierta limitación de carácter económico. En el tercer caso, la intervención se realiza por parte de un organismo oficial (CEDEX- Ministerio de Fomento), con un control mucho más exhaustivo de puntos y pruebas realizadas.

Los resultados se presentan de forma individualizada para cada uno de ellos, para realizar una comparativa del conjunto de movimientos al efecto de comprobar si existen "coincidencias" que permitan sacar conclusiones.

## **4. PARTICULARIDADES DEL SISTEMA DE RECALCE APLICADO: LAS INYECCIONES ARMADAS**

La técnica de las inyecciones armadas, tiene una gran versatilidad, tanto por su ejecución, como por las posibilidades de su aplicación. Es una técnica con poca difusión entre los técnicos de la edificación. Sin embargo en la última década se dispone de varias referencias bibliográficas al respecto que la dan a conocer (10) (11) (12) (13) (14).

Si bien no es el objeto de este trabajo, es de interés hacer una serie de precisiones.

La técnica de la inyección armada son inyecciones a baja presión, con la incorporación de un tubo de acero, que se dejará en su interior y funcionará como refuerzo armado del conjunto (de ahí su nombre). Estos tubos están instrumentados con válvulas antirretorno (manguitos) equidistantes, lo que facilita una gran capacidad de control.

Durante su ejecución, el entorno de presiones que se utilizan es un máximo en la apertura de los manguitos de entre 12 y 25 Kg/cm<sup>2</sup>, con un régimen normal en la inyección entre 2 y 10 Kg/cm<sup>2</sup>.

Esta introducción de un fluido a baja presión con la misión de fracturar el terreno, puede producir movimientos en el terreno, que pueden transmitirse a la estructura sobre rasante, bien por empuje directo, bien por acumulación, o por desplazamiento del agua del terreno. Estos movimientos son datados en la bibliografía existente como milimétricos (8), pero están muy relacionados con el proceso de ejecución.

### 5.1. Caso 1: Edificio en calle Zazuar nº 6, de Madrid

El primer ejemplo a presentar, versa sobre el n.º 6 de la calle Zazuar, del barrio de Santa Eugenia de Madrid. Se trata de un edificio de planta rectangular con dimensiones aproximadas de 55 x 25 m, y 12 alturas (dos de ellas semienterradas), y dividido simétricamente, mediante una junta de dilatación.

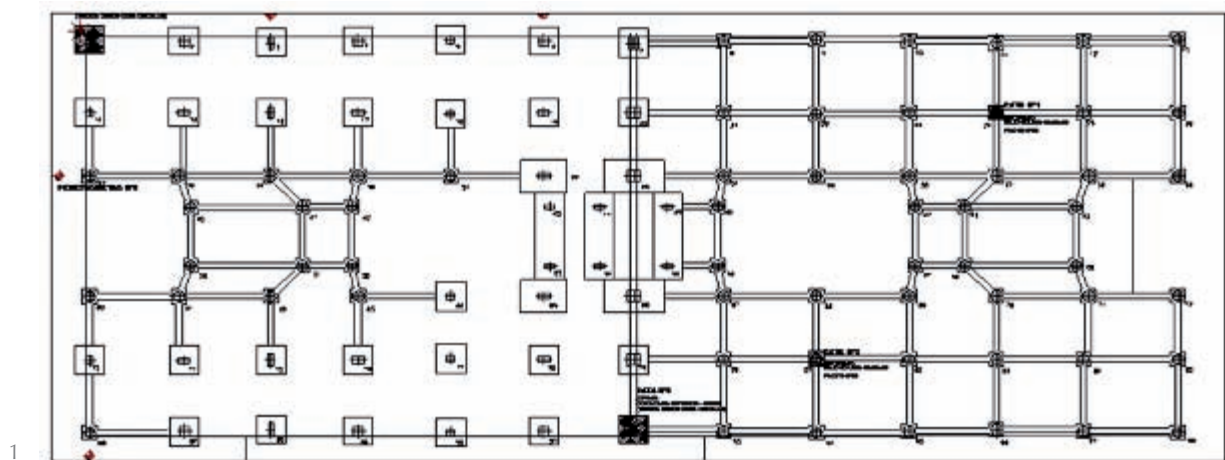
La cimentación que presenta el bloque, por razones desconocidas, dispone en la mitad oriental de pilotes, un único pilote por pilar, con una profundidad estimada de 15 m; mientras la mitad occidental dispone de zapatas aisladas (Figura 1)

El edificio sufría un movimiento constante en su mitad oriental, desde el final de su construcción como demuestran las diferentes nivelaciones realizadas desde entonces (Figura 2).

La zona donde se asienta el barrio de Santa Eugenia, es una zona de transición entre peñuelas de alta plasticidad y un subsuelo yesífero, con una gran variación de las

1. Planta de cimentación del edificio de C/ Zazuar n.º 6. Se diferencia la zona de zapatas y la posición de los pilotes.  
(Documentación cedida por CDE Arquitectura)

2. Lecturas de los movimientos previos del edificio tomadas por INTECTO.  
(Documentación aportada por la comunidad de propietarios)

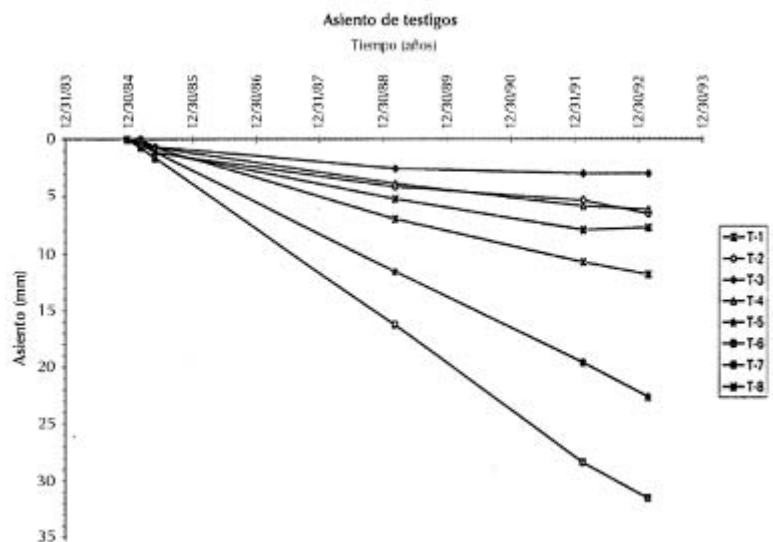


Un factor a considerar en el trabajo que se presenta es la existencia de movimientos previos en los edificios de gran cuantía, y que condicionan la admisibilidad de nuevos movimientos en las estructuras sobre rasante.

### 5. LOS CASOS ANALIZADOS

En la investigación realizada se ha recopilado información de diversos casos, si bien se ha considerado presentar solo tres de ellos, ya que sirven como aglutinadores de la información recogida en el resto de casos.

A continuación, de cada uno de ellos, se expone una breve descripción de la situación de partida de cada uno de ellos, con las particularidades geotécnicas (diferentes en cada uno de los casos), y las particularidades de la aplicación del recalce ejecutado.



3. Franja de tratamiento de terreno no tratado Documentación cedida por CDE Arquitectura.

condiciones geotécnicas según la ubicación de cada edificio. Los estudios geotécnicos concretos para este edificio, determinan la estratificación del terreno bajo el edificio, sintetizada del siguiente modo:

- Capa de suelo vegetal y rellenos de profundidad variable (menor de 4,5 m), que queda por encima de la cota de apoyo de la cimentación.
- Estrato de arcillas de diversa coloración hasta profundidades variables de 28 a 42 m, con presencia de cierto nivel de sulfatos, y sepiolitas, con una alta plasticidad con un cierto nivel de expansividad.
- Un tercer nivel de yesos, con procesos de carstificación que se evidencian en las cavidades detectadas, a partir de los 36 m, con alturas no mayores de los 3,5 m.

Ante la situación presentada se establecieron principalmente dos hipótesis de causa: Un posible problema ubicado a niveles profundos, con colapso de alguna cavidad por carstificación del nivel de los yesos. Si bien, en el caso de producirse un colapso de este tipo, y según la bibliografía especializada, este no repercutiría en la cimentación de un modo instantáneo, dilatándose sus efectos en el tiempo, ni tampoco se produciría un asentamiento progresivo y constante durante treinta años, como es el caso que nos ocupa.

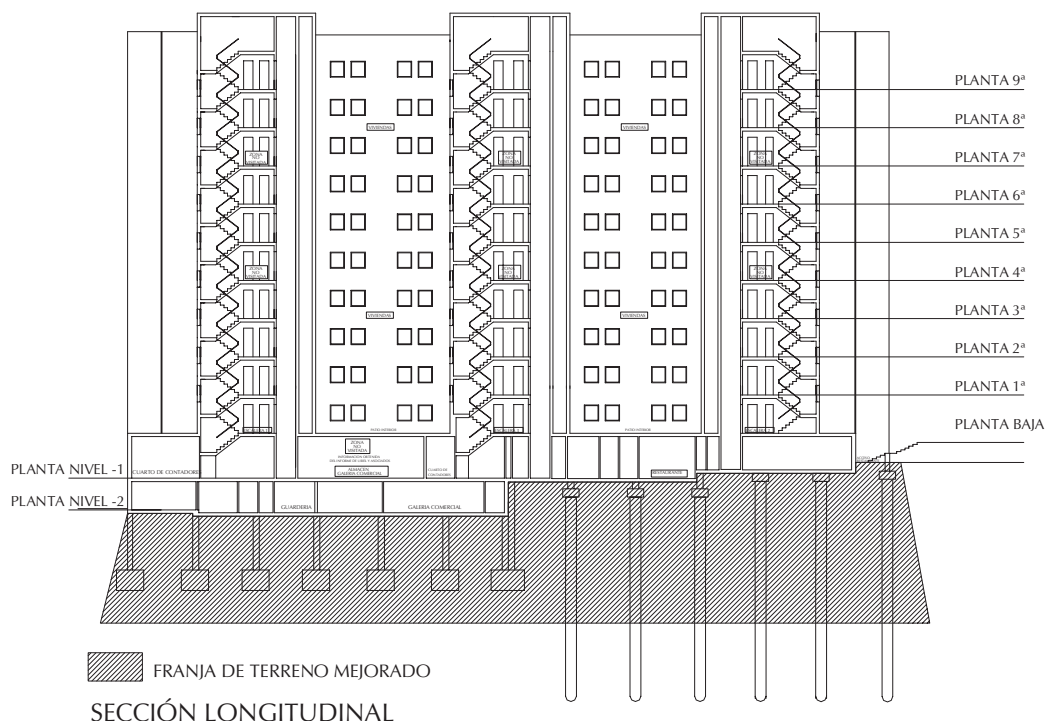
Se plantea una segunda hipótesis, un fallo en la transmisión de carga al terreno por parte de la cimentación existente, efecto

que ocurre en cotas superficiales (menores de 15 m). Este fallo puede venir producido por diversas causas: por insuficiencia en la longitud inicial de los pilotes, por problemas en la adherencia del fuste del pilote con el terreno arcilloso, o por problemas en la propia integridad de los pilotes. Cualquiera de estos problemas da una sintomatología compatible con la sufrida por el edificio.

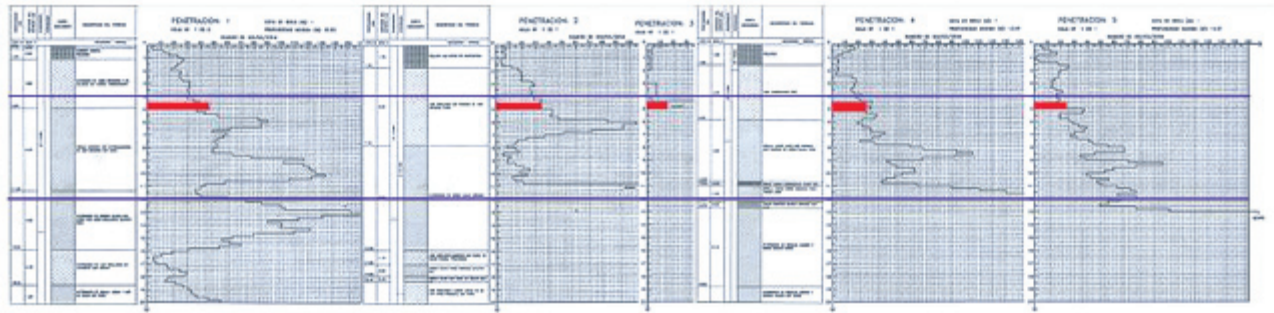
La conclusión final es que la causa de las afecciones se puede considerar que es una inadecuación de la cimentación al tipo de suelo, provocada por un escaso conocimiento geotécnico del terreno y un mal dimensionamiento. La zona dañada principalmente coincide con la correspondiente a los pilotes (15).

La solución planteada después de los análisis y estudios realizados fue la de ejecutar un tratamiento del terreno mediante inyecciones armadas en la franja superior del terreno (Figura 3), hasta una profundidad de tratamiento de 7,5 m, mediante la ejecución de abanicos de taladros con diversa inclinación de modo que todos los soportes dispongan de un prisma de tratamiento hasta la cota indicada, realizados desde el exterior del edificio, para en su conjunto crear una “pseudo-losa” de terreno tratado.

Una vez finalizadas las actuaciones (enero de 2002), las nivelaciones de control realizadas por más de cinco años, han dado un movimiento nulo de los elementos estructurales de los niveles inferiores del edificio, esto es, no se ha detectado ningún descenso-ascenso de ninguno de los puntos testados.







4

Hay que tener en cuenta que los movimientos que sufría el edificio previo a la intervención se cuantificaban entorno los 3 mm al año. Por ello, se podría concluir que el recalce realizado ha cumplido su función, consolidando el terreno de apoyo de la cimentación y por tanto eliminando las causas originales del movimiento.

## 5.2. Caso 2: Edificio calle Fuentespina, n.º 12, de Madrid

Este edificio, situado en el mismo barrio y de idéntica tipología al estudiado en el caso anterior salvo la cimentación, presentaba un asentamiento localizado en su mitad norte, con movimientos ligeros en la otra mitad. El movimiento sufrido por el edificio desde la finalización de su ejecución, se manifestaba continuado, con una velocidad máxima de asientos de 2,4 - 2,5 mm al año, con variaciones estacionales, de mayor importancia en periodos postestivales de años especialmente secos (como 1997). La estratificación del terreno bajo el edificio, se puede sintetizar del siguiente modo:

- De 0 a 30 m, salvo pequeños niveles de rellenos, presenta alternancias de terrenos duros, limos y arcillas carbonatadas (margas) con tramos calizos
- Entre los 30 y los 50 m aparecen yesos, en una amplia variedad de formas, con episodios de karstificación, entre 38,10 y 41,25 m de pequeño tamaño.
- Por debajo de los 50 m, se ha encontrado hasta la profundidad explorada una

marga yesífera muy dura, sin evidencia alguna de karstificación.

La cimentación de este edificio es de zapatas aisladas sin arriostrar. De su revisión se ha detectado una deficiencia dimensional en más del 75% del número total de elementos.

La situación general del apoyo de las zapatas es un falso firme, como se puede comprobar en las pruebas geotécnicas realizadas y que se muestran en la Figura 4.

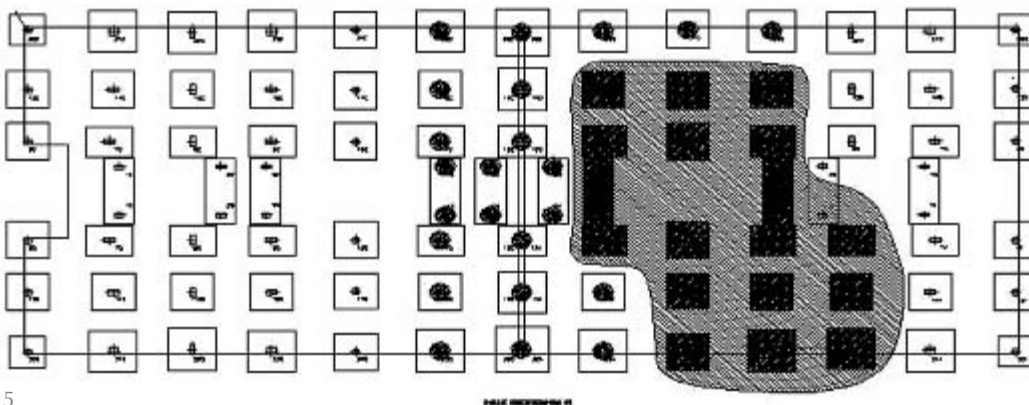
En 1986 fue recalzado parcialmente mediante micropilotes (Figura 5). El control de asientos determinó que había funcionado inicialmente, si bien pronto continuaron los movimientos al mismo ritmo que inicialmente. Analizado esta situación, se determinó que la insuficiencia en el número y/o profundidad de los micropilotes, así como un diseño excesivamente ajustado a la zona dañada son la causa del fracaso de dicho recalce.

Del análisis sobre la topografía previa a la urbanización del edificio, se determinó la existencia de un antiguo cauce de agua que atravesaba la posición del edificio, coincidiendo con la zona de mayor afección (Figura 6), aspecto que no fue tenido en cuenta a la hora de cimentar originalmente (16).

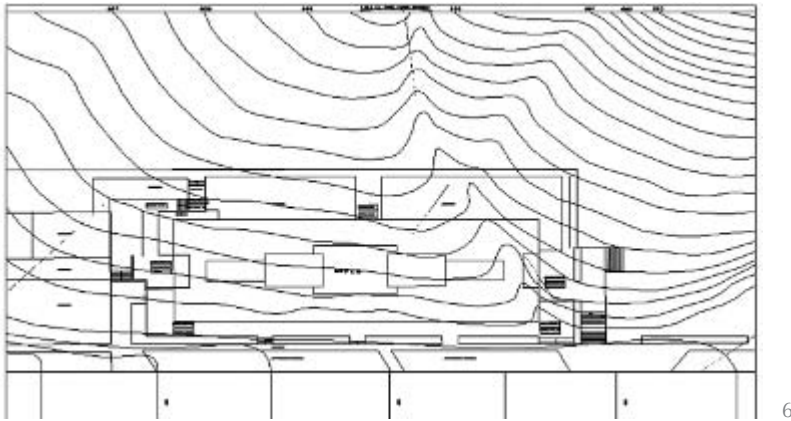
La causa de los movimientos del edificio, era por tanto la inadecuación de la cimentación al tipo de terreno donde se apoya, descartando la afección de las cavidades existentes a gran profundidad.

4. Gráficos del comportamiento del terreno. Se indica posición de la cimentación (banda roja), y nivel de firme (banda azul inferior). (Documentación aportada por la comunidad de propietarios)

5. Planta de cimentación del edificio de la c/ Fuentespina nº12. Se marca la zona recalzada con micropilotes en 1986. (Documentación cedida por CDE Arquitectura)



5



6. Plano topográfico, donde se puede observar el cauce previo a la urbanización.

(Documentación cedida por CDE Arquitectura)

7. Planta del actual Parador Nacional de Carmona, donde se marcan las grietas existentes en el terreno producidas en 1504.

8. Corte estratigráfico, donde se observa el efecto de la falla originada en 1504, y el apoyo diferencial de la cimentación del edificio.

El sistema de intervención ejecutado fue mediante inyecciones aramadas, la misma técnica que en el caso anterior si bien con modificaciones en el proceso de ejecución, debido a las particularidades concretas de este edificio. Se trató bajo cada zapata un pisma con profundidad variables, desde 4 a 8 m. Se ejecutó la mitad del tratamiento desde el sótano accesible, y la otra mitad del edificio correspondiente a la fachada principal desde el exterior.

La ejecución del recalce se realizó durante el año 2002. Finalizadas las operaciones se realizaron controles de movimientos por un breve periodo de tiempo, sin datar movimiento, y ello junto con la nula evolución de los daños por varios años constatada, por lo que se consideró estabilizado el terreno donde se apoya la cimentación, garantizando el contacto y buen comportamiento de esta y por tanto la causa del origen del movimiento del edificio estaba subsanada.

### 5.3. Caso 3: Edificio del Parador de Carmona, en Sevilla

El tercer caso versa sobre el Parador nacional de turismo de Carmona, en la provincia de Sevilla, construido en 1976, sobre

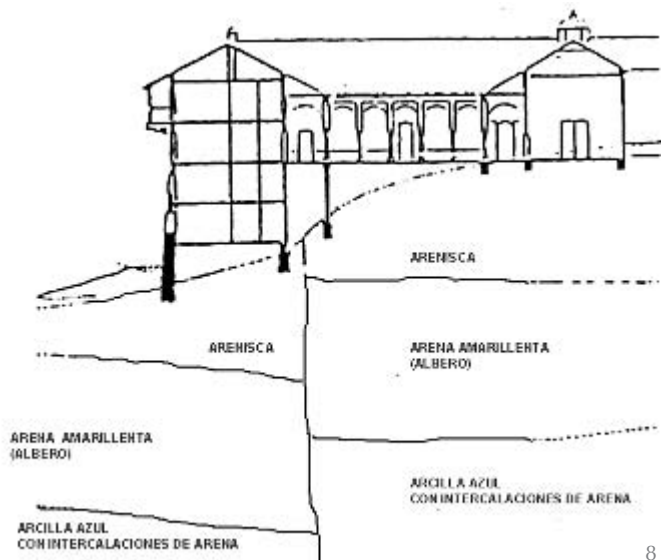
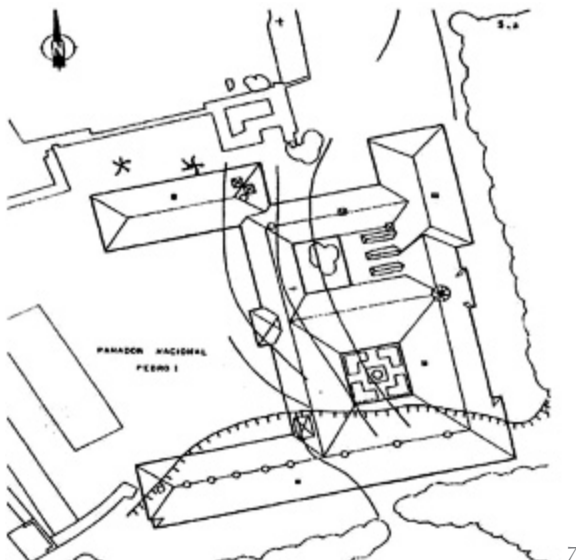
la antigua ubicación del castillo de Pedro I “el cruel”, destruido en el terremoto de de 1504, llamado de Almería.

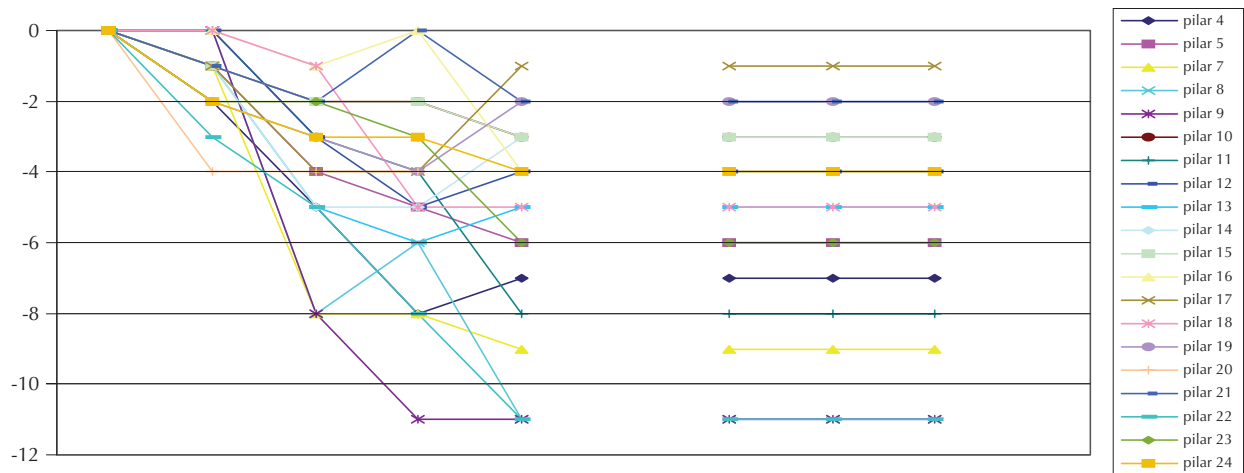
El ala sur del Parador está construida sobre el borde del macizo rocoso, que en el terremoto referido sufrió un movimiento de un metro de desplazamiento horizontal y otro metro vertical, que provocó una grieta principal en el bloque de arenisca, que afectaba también a los estratos inferiores, junto con una familia de grietas de menor entidad (Figuras 7 y 8), que son el origen de los problemas principales sufridos por el edificio y que se estudian en este trabajo.

La estratigrafía básica se podría resumir en tres unidades principales, (Figura 8):

- Bloque de arenisca estable, con un alto grado de erosión en los cortes expuestos.
- Estrato subhorizontal de arenas de color amarillento, conocida como “albero”.
- Estrato de arcillas azules, con alternancia de capas blandas y de mayor rigidez, con alto poder expansivo.

Desde el inicio de la actividad del Parador, el edificio sufrió movimientos que implicaron sucesivas intervenciones infructuosas (1981 y 1987) ya que no determinaron el problema real, lo que ha sido objeto de varios trabajos (17) (18) (19) (20). Es el encargo al laboratorio de geotecnia del CEDEX del estudio en profundidad de la problemática el que indica a la grieta del bloque de arenisca producida durante el terremoto indicado, como la causa principal, ya que además de romper la homogeneidad y continuidad de los estratos y variar las zonas de contacto, se configura como la entrada de agua a las capas de arena y arcilla más profundas. En dicho estudio se establecen los aspectos que influyen en el origen de los movimientos que afectan al edificio.





9

Con estos datos se consideró que la solución más adecuada ante los problemas detectados, era la ejecución de inyecciones armadas. Se diseñaron abanicos de diferente número de taladros, inclinación y profundidad, en función de la ubicación del abanico. La profundidad fue hasta llegar a la zona arcillosa, cosiendo la falla existente. Los abanicos se realizaron desde el exterior del edificio, y desde los patios interiores, debiendo cuidar los acabados existentes. Esta actuación fue ejecutada durante el año 1997, sin volver a producirse incidencias hasta la fecha.

## 6. ANÁLISIS DE LOS MOVIMIENTOS DE LOS EDIFICIOS EN LOS PROCESOS DE RECALCE EJECUTADOS

El tratamiento de inyecciones armadas se efectúa siempre con un control muy cuidadoso de asentamientos en la zona tratada y en zonas adyacentes, instalándose regletas con división en milímetros, que se fijan adecuadamente a los soportes (pilares y muros) de la edificación y se nivelan antes, durante y después del tratamiento. Dos tipos de sistemas de control se establecen, uno de ellos desde la propia Empresa ejecutante, y dentro de la propia ejecución, controlando el nivel en cada punto donde se inyectaba. El segundo tipo de control para conocer el régimen del movimiento global del edificio, se realiza mediante controles topográficos periódicos, y de cuyo proceso se obtienen las gráficas de movimientos sufridos por el edificio en sí.

### 6.1. Los movimientos del edificio en el recalce de la calle Zazuar n.º 6

El control realizado en este caso tuvo una prolongación inhabitual en estos casos a petición expresa de la propiedad. Además del control durante la ejecución con una periodicidad más corta, se realizaron hasta tres campañas posteriores (2002, 2004 y 2007), para comprobación de la existencia de movimientos.

El gráfico de movimiento de la totalidad del testeo de un amplio número de pilares, data un comportamiento complejo de leer (Figura 9), con variaciones individuales que responden a la cronología del tratamiento, y a la mayor o menor afección patológica, pero que si confirman en sus fases finales la paralización del movimiento del edificio.

Para el objeto de este trabajo se han analizado los movimientos de los pilares de forma individualizada, y se ha observado que algunos de ellos muestran un comportamiento bastante homogéneo (Figuras 10 y 11).

Se puede observar que el movimiento marca la tendencia descendente previa del edificio (por su afección patológica previa), con un ligero incremento del descenso al inicio del tratamiento (por la naturaleza específica del tipo de cimentación y tipo de terreno), y con una respuesta de recuperación del movimiento (también propia de la naturaleza del terreno encontrado), con una estabilización final del mismo (Figura 10).

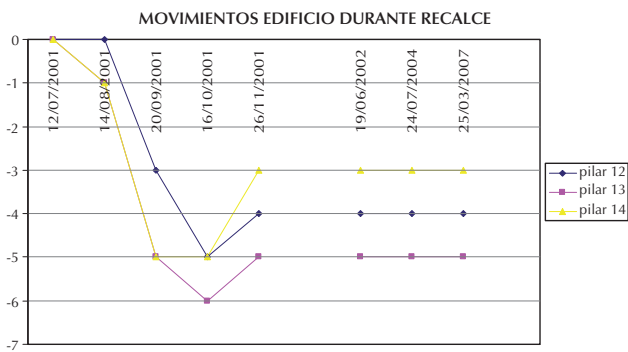
Es de referencia que en el caso que nos ocupa, también se muestran algunos puntos, en los que no se produce tal recuperación, siendo la estabilidad del elemento la situación final del movimiento, probablemente debido a la naturaleza del suelo, y al ser los últimos puntos de ejecución del tratamiento, y en la zona de menor afección (Figura 11).

### 6.2. Los movimientos del edificio en el recalce de la calle Fuentespina n.º 12

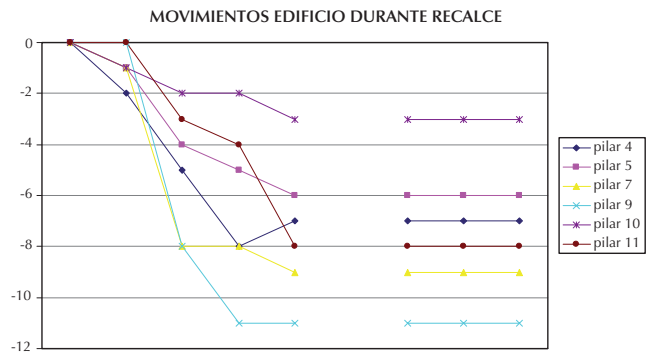
El procedimiento seguido en este segundo caso es similar al anterior, salvo que el testeo fue sobre los pilares exteriores, y que el seguimiento posterior solo consistió en un control durante los tres meses siguientes a la finalización de las actuaciones. Esta decisión fue de la Propiedad de la finca, al efecto de no aumentar los costes totales de las obras realizadas, debido a sus dificultades económicas.

9. Diagrama de movimientos datados durante las nivelaciones en periodo de obra, en el Caso 1.

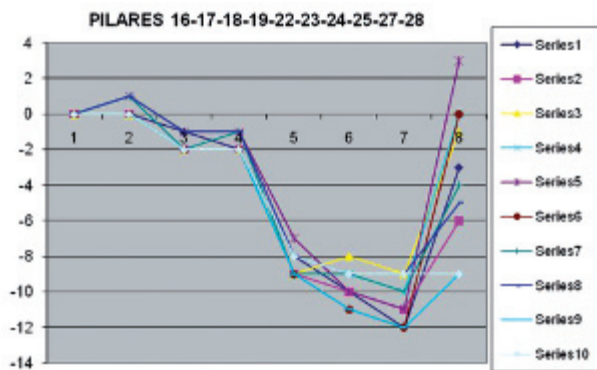




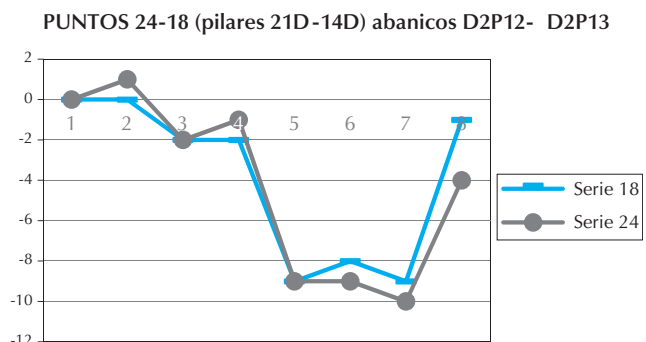
10



11



12



13

10. Análisis individualizado pilares 12, 13 y 14; en el Caso 1.

11. Análisis pilares 4, 5, 7, 9, 10 y 11; en el Caso 1.

12. Análisis individualizado pilares en zona afectada, en el Caso 2.

13. Análisis pilares 18 y 24, en el Caso 2.

Los resultados dieron una estabilización del movimiento de los puntos testados en el mismo valor que la última medición de obra, lo que se ratificó en los controles de evaluación de daños seguidos en el edificio por un periodo mayor de tiempo. Se debe indicar que se manifestaron puntualmente afecciones de errores de lectura, así como la modificación de la posición de las regletas por parte de los viandantes, lo que aportaba anomalías en los gráficos no correspondientes al movimiento real del edificio. En los movimientos datados correspondientes a la zona de mayor movimiento (Figura 12), se observa un comportamiento similar al descrito en el caso anterior, si bien hay que indicar que el inicio del control se realizó de forma inmediata a la ejecución por lo que no hay una detección tan significativa del movimiento inicial, además de ser este mucho menor que en el caso anterior.

Al analizar los valores individualizados de algunos de los puntos medidos (Figura 13), se puede observar la incidencia del proceso de obra. El inicio de las actuaciones comenzó por el punto 24 y la acumulación de inyección en poco tiempo (al no haber mucho "tajo" abierto, se concentra la actuación en pocos puntos, lo que es un error), provoca acumulación de presión, y levantamientos en el edificio, que luego tienen una continuidad del descenso más acusada.

Se observa que la recuperación de movimientos se produce tras un "impass" de tiempo mayor que en el caso anterior, lo

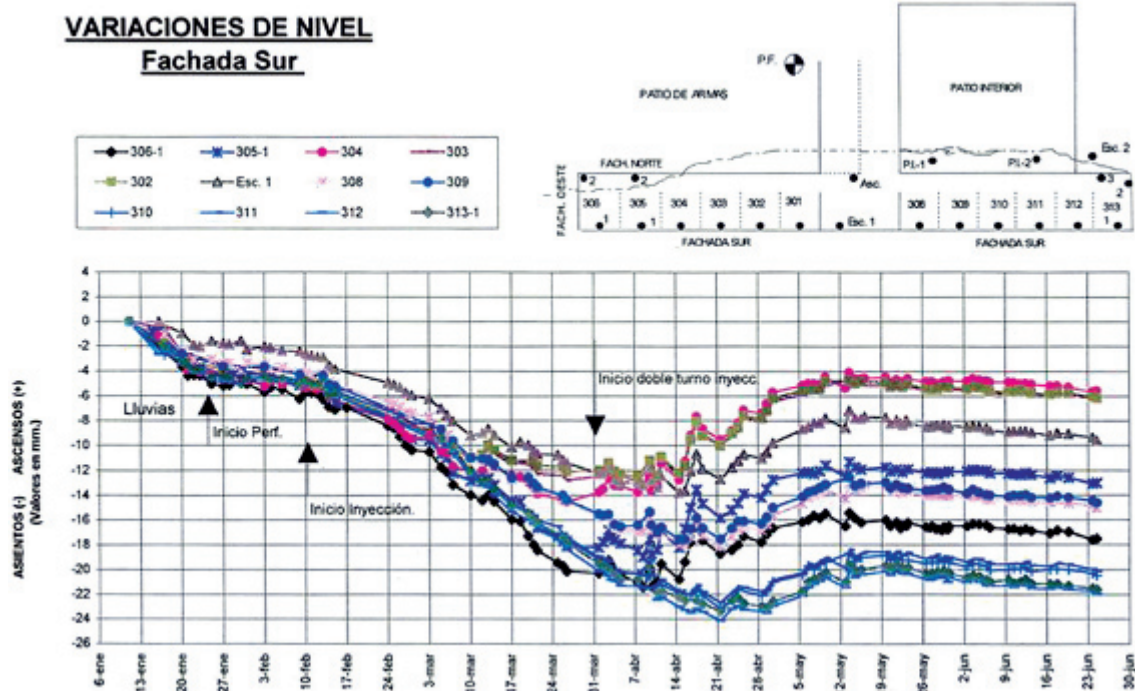
que se debe al proceso de ejecución y los plazos establecidos por la dirección técnica de la obra, que impusieron una mayor separación de tiempo entre las fases de inyección como respuesta a lo indicado anteriormente.

### 6.3. Los movimientos del edificio en el recalce del Parador de Carmona, en Sevilla

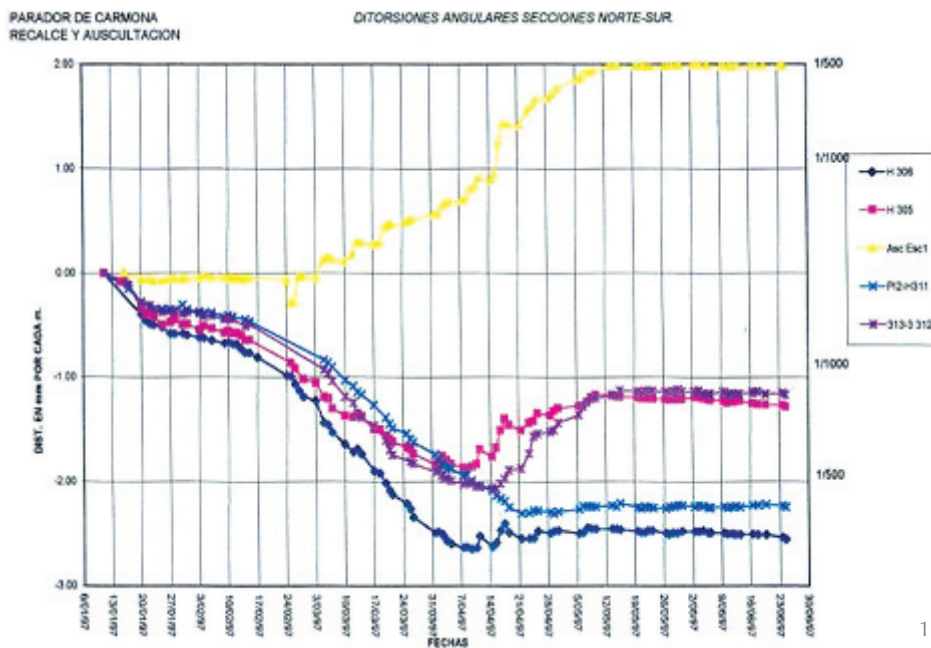
En el tercer caso, los sistemas de control realizados son más exhaustivos y con una periodicidad menor (mayor nivel económico de inversión), por lo que las gráficas de control tienen una mayor cuantía de datos. Así mismo es mayor el tipo de control realizado, con campañas de nivelación de alta precisión, convergencias entre puntos, e instrumentación mediante extensómetros e inclinómetros de 50 metros de profundidad en las fachadas que dan al corte del bloque de arenisca.

Los gráficos de cada uno de los sectores afectados, en las diferentes lecturas a lo largo de toda la actuación datan desde enero de 1997 hasta junio de 1997, con mediciones semanales. Del gráfico de la fachada sur (Figura 14) se puede observar que de forma previa al inicio de los trabajos de perforación hubo un movimiento de descenso casi constante, y que coincidió con un periodo de lluvias, junto al movimiento previo del edificio. También se observa un descenso del movimiento en la fase de perforación, quizá por servir como alivio del agua acumulada en la zona tratada.





14



15

La respuesta del terreno al inicio de la fase de inyección fue de continuidad del descenso en proporción similar a la inicial (aportación de humedad junto a la lechada de inyección).

Es en el momento de inicio del doble turno de inyección cuando se comienza a observar una recuperación del movimiento del terreno como respuesta a la creciente presión que va adquiriendo el terreno como resultado del tratamiento ejecutado. Este comportamiento es diferente en la fachada norte que se localiza sobre el lado del bloque de arenisca sin movimiento. Esto se puede observar en las gráficas de distorsión angular (Figura 15), donde se observa que el movimiento de la fachada norte (de color amarillo) implica un

incremento de movimiento hasta su estabilización final, al haberse realizado en esta zona el mismo ritmo de tratamiento que en el resto del edificio, sin haber tenido en cuenta la necesaria diferenciación por tener circunstancia de partido diferenciales.

Una vez finalizado el tratamiento se continúa con la nivelación observándose una tendencia a la estabilidad, si bien con la datación de movimientos mínimos, y de forma uniforme en toda la edificación, tanto en zonas recalzadas como no recalzadas. Esto puede plantear un movimiento de naturaleza mucho mayor, en el desplazamiento global del macizo rocoso asociado sobre el tipo de apoyo del mismo.

14. Gráfico de movimientos de nivel, datados en el proceso del Caso 3. En esquina superior derecha esquema de localización de referencias.

15. Gráfico de distorsiones angulares entre las fachadas norte y sur correspondientes al Caso 3.

16. Movimientos tipo observados en el Caso 1: Zazuar 6.

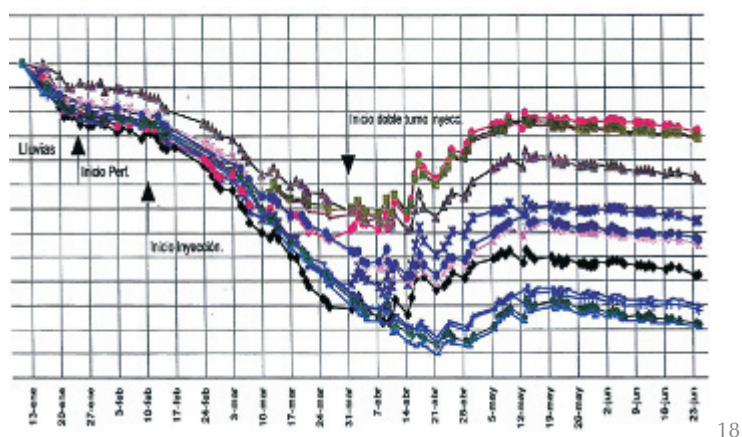
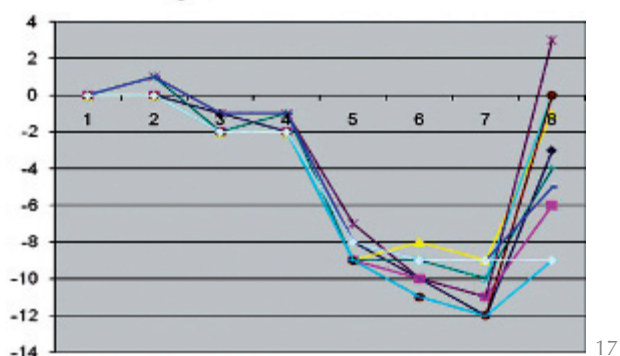
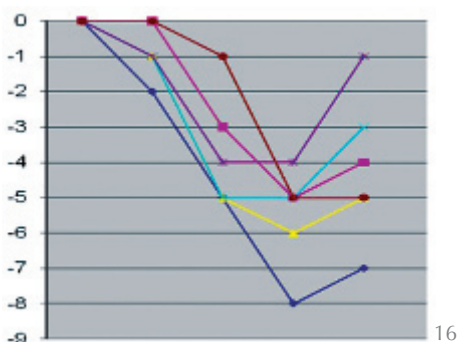
17. Movimientos tipo observados en el Caso 2: Fuentespina 12.

18. Movimientos tipo observados en el Caso 3: Parador de Carmona.

## 7. ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS MOVIMIENTOS OBSERVADOS

Es difícil realizar una comparación directa mediante la superposición de los datos de los gráficos en la misma escala de tiempos, ya que las circunstancias de partida son diferentes (los movimientos iniciales de cada edificio, las causas de los movimientos) así como los tratamientos ejecutados (dimensionamiento, velocidad de ejecución, densidad de tratamiento), por tanto no son idénticos, si bien tienen la similitud de no partir de un movimiento "cero", y utilizan la misma técnica de recalce.

A pesar de ello en los movimientos presentados si se pueden observar ciertos aspectos de un comportamiento similar en los tres edificios analizados. Se debe indicar que en el proceso de la investigación estas similitudes se han reiterado en otros casos. En todos ellos (Figuras 16, 17 y 18) la morfología del movimiento responden de una forma similar y que procedemos a analizar a continuación.



Como se puede observar en los gráficos de movimientos presentados con anterioridad, si se esquematizan sus gráficos, se pueden apreciar hasta cinco zonas de comportamiento en el movimiento del edificio (Figura 19), según las pendientes de las líneas que indican la intensidad y sentido del movimiento.

Las diferentes zonas que se observan en la Figura 19 serían:

### 1. Movimiento previo del edificio. No se ha actuado aún en el edificio.

En esta fase se observan descensos mínimos, en los que influye fundamentalmente, el grado de movimiento inicial del edificio. Es diferente en cada parte del edificio, en función de la homogeneidad e intensidad del movimiento previo. En ocasiones se puede observar el efecto de la pluviosidad en el movimiento.

### 2. Fase de perforación e inicio de la inyección.

Se observa un incremento del movimiento, influenciado por la fase de perforación (vibración y pérdida temporal de cohesión del material), además de servir como alivio del agua acumulada en las zonas anexas tratadas con la consecuente relajación del material. En las primeras fases de la inyección, la introducción de las lenguas de lechada con la fracturación del terreno producida por la presión, junto con cierto grado de humedad que aporta la lechada, puede afectar más en algunos tipos de suelo, incrementa la potencial disminución de la capacidad portante, lo que favorece un incremento puntual del movimiento inicial.

### 3. Fase de colmatación. Efecto de la inyección.

Una vez fraguadas las primeras lenguas de lechada, junto con el efecto de confinamiento que produce el tratamiento de los puntos de inyección próximos, las siguientes fases tiene el efecto de aumentar la cohesión en el terreno, lo que disminuye la deformabilidad del mismo, y por tanto se reducen los asientos, la pendiente del gráfico se vuelve más suave, pudiendo en ocasiones llegar a la horizontal, o incluso tener pendiente contraria. Al controlar el volumen de inyección introducida, el efecto es progresivo, y depende en gran medida de la cohesión y modulo de deformación del terreno previo.

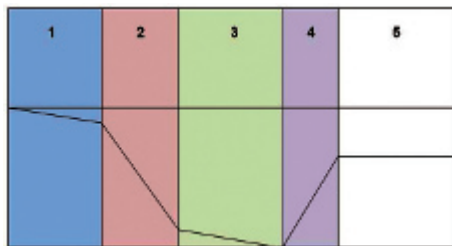
### 4. Fase de consolidación del terreno – recuperación.

En la continuidad del proceso, en tanto se obtiene la presión final requerida en proyecto, se produce una recuperación

del movimiento del terreno, con el cambio de pendiente del gráfico obtenido, como respuesta a la creciente presión que va adquiriendo el terreno como resultado del tratamiento ejecutado. La capacidad de respuesta (pudiendo llegar a superar el nivel cero inicial), depende en gran medida de la tipología del suelo, siendo mayor cuanto menor cohesión inicial tuviera el suelo. En ocasiones esta recuperación no se produce, bien por tener el suelo un alto grado de indeformabilidad, o bien por ser un tratamiento mínimo e influenciado por la ejecución del tratamiento de zonas anexas.

##### 5. Fase final estabilizada.

Una vez finalizado el tratamiento, si se continúa con la nivelación de control, se observa una tendencia a la estabilidad total, con la ausencia de movimiento. Salvo que haya movimientos de carácter más global (movimientos territoriales) los resultados son de movimiento nulo de carácter geotécnico.



19

Estas zonas de movimiento diferencial, se han datado en la totalidad de los casos estudiados, y concretamente en los tres presentados en este trabajo. Se podría decir por tanto que es el comportamiento común en los casos con las condiciones de partida que se han presentado.

La gran diferencia en su cuantificación está en el grado de movimiento inicial, que como se ha observado influye en gran medida en el comportamiento del edificio ante el tratamiento, siendo este el motivo de los movimientos cuantificados de 11 a 20 mm según los casos. Conocer este aspecto es fundamental para poder adoptar las medidas adecuadas de corrección ante las deformaciones de modo que los edificios sean capaces de asumirlas en el proceso de recalce.

## 8. CONCLUSIONES

De la investigación realizada, la primera conclusión que se puede observar es que la técnica de las inyecciones armadas, es un sistema adecuado para la interrupción de

procesos de movimientos continuados de origen de carácter geotécnico, con márgenes de movimientos propios (independientes del movimiento previo sufrido por el edificio), y dentro de los límites admisibles de la estructura sobre rasante.

Dentro de los objetivos planteados en la investigación, se puede indicar que del análisis de las intervenciones presentadas se deduce un comportamiento asimilable en el comportamiento de los movimientos de los edificios recalzados, pudiendo identificar hasta cinco fases en el proceso de ejecución.

Estas tipologías de movimientos aparecen en edificios con diferente problemática, diferente terreno, y diferente modo de ejecutar las inyecciones armadas, por lo que se puede concluir que es el comportamiento tipo en estas actuaciones.

Su conocimiento es de gran importancia para planificar la ejecución de las Inyecciones, no basta por tanto con definir un grado de presión, una velocidad de inyección, o el volumen de lechada a introducir, como determina actualmente el Código Técnico de la Edificación (art 8 DB-SE-C).

Es fundamental un seguimiento y control de la ejecución de la inyección durante el propio proceso, de modo que se pueda conocer la evolución de la ejecución del proceso, y por ende saber en qué fase estamos en cada momento, y poder actuar en cada momento según lo requiera el edificio variando los parámetros de la ejecución de las inyecciones según convenga

Esta investigación está dentro de los trabajos desarrollados por el grupo de investigación "Intervención en la edificación y arquitectura sostenible" de la Universidad de Alcalá, en el campo de la intervención de carácter geotécnico.

## AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo ha sido gracias a la colaboración en la cesión de la información y la autorización para su interpretación e inclusión en este trabajo de las empresas CIMTRA y OPG (ejecutantes de la técnica de las inyecciones armadas), CDE Arquitectura (estudio de arquitectura proyectista de la intervención de los dos primeros casos estudiados y otros incluidos en la Investigación general) y al CEDEX (autor del tercer caso analizado).

19. Zonas de movimiento detectadas en el análisis comparativo realizado.



## BIBLIOGRAFÍA

- (1) González, J.L. *Claves del construir arquitectónico*. Ed Gustavo Gili. Barcelona, 1997
- (2) Da Casa, F.; García, A.: "A propósito de la intervención en el Patrimonio construido". V Congreso Internac. *Restaurar la memoria. Patrimonio y Territorio*, 2006. Valladolid.
- (3) Da Casa, F.; Echeverría, E.; Celis, F.: "Los recalces de cimentación. Una técnica de intervención específica". *Revista dda* N° 4 (2001), pp. 140-154.
- (4) Da Casa, F.; Echeverría, E.; Celis, F.: "El recalce de cimentaciones en el Patrimonio Arquitectónico". *VIVIENDA* (2005), pp. 104-107.
- (5) Da Casa, F.: "The intervention in the foundations of historical areas in cities" II Conferencia Europea de la Asociación Internacional de Geología aplicada a la Ingeniería- EU-ROENGEO 2008. *La ciudad y su entorno subterráneo*, Ed. IAEG- UPM. Madrid, 2008.
- (6) Croci, G. *The Conservation and structural restoration of architectural heritage*. pp. 115-146, Ed. Computational Mechanics Publication. Southamton (UK) y Boston (USA), 1998.
- (7) Da Casa, F.; Echeverría, E.; Chias, P.; Celis, F.: "Las técnicas de intervención bajo rasante, la importancia de su conocimiento y difusión en la Arquitectura", II Jornadas de Investigación de Arquitectura y Urbanismo IAU06, Ed. Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona, 2006.
- (8) Jessberger, H.L.: *Soil Grouting general report: improvement of ground*. Proceedings of 8th European Conference on soil mechanics and foundation engineering, pp. 1069 - 1078, Helsinki, 1983.
- (9) Santos, A.: "Inyecciones de impregnación y de fracturación". Curso sobre técnicas generales de refuerzo del terreno y sus aplicaciones, Ed. CEDEX, Ministerio de Fomento. Madrid, 1997.
- (10) Santos, A.; Garrido, C.; et ál.: *Sistema de mejora prefijada del terreno compatible con movimientos milimétricos del entorno, Libro homenaje a José Antonio Jiménez Salas*, AA.VV, Ed. Ministerio de Fomento. Madrid, 2000.
- (11) Cuellar, V.: *Inyecciones por fracturación e inyecciones de impregnación*, IV Jornadas Técnicas SEMSIG-AETESS, p.p. 11-33, Ed. CEDEX. Madrid, (2004).
- (12) Da Casa, F.: "La inyección Armada técnica específica para el Recalce de cimentaciones específico en el Patrimonio Arquitectónico". Jornadas sobre Geología y Geotecnia del Patrimonio Histórico. Jornada 1ª: *Edificios Históricos*, Ed. AEGAIN. Madrid, 2004.
- (13) Da Casa, F.; Celis, F.; Echeverría, E.: "La inyección armada: aplicación en la edificación actual". Cap 12. *INGEOTER*, Vol. 6. pp. 349 a 370. (2005). Ed. U.D. Proyectos. ETSI Minas- Universidad Politécnica de Madrid. Madrid.
- (14) Da Casa, F.; Echeverría, E.; Celis, F.: "La intervención bajo rasante. La importancia de su conocimiento. La técnica de las Inyecciones Armadas." *Informes de la Construcción*, Vol. 59 nº 505 (2007), pp. 21-35.
- (15) Da Casa, F.: "La problemática de los recalces de cimentaciones: un ejemplo en Santa Eugenia. Madrid". *BIA*. Vol. 218 (2002), pp. 40-44.
- (16) Echeverría, E.; Da Casa, F.: "La Expresión Gráfica Aplicada al análisis de la patología de las edificaciones". IX Congreso Internacional de Expresión Gráfica Arquitectónica, pp. 221-225, Ed. Universidad de La Coruña. La Coruña, 2002.
- (17) Santos, A.; Cuellar, V.: *Mechanical improvement of an angillaceous marl through cement-based reinforced grouting, Grouting Soil Improvement. Geosystems Including Reinforcement*. Hans Rathmayer Ed., Finnish Geotechnical Society. Helsinki, 2000.
- (18) Cuellar, V.; Martínez, J.M.; Santos, A.; Sola, P.: *Partial underpinning of the Parador of armona trough use of reinforced grouting, Grouting Soil Improvement. Geosystems Including Reinforcement*. Hans Rathmayer Ed., Finnish Geotechnical Society. Helsinki, 2000.
- (19) Santos, A.; Da Casa, F.: "Inestabilidad en un macizo rocoso en ámbito urbano: el Parador Nacional de Turismo de Carmona (Sevilla)". VI Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas Inestables, Ed. Universidad Politécnica de Valencia y U.P. de Catalunya. Valencia, 2005.
- (20) Da Casa, F.; Echeverría, E.; Celis, F.; Santos, A.: "La necesidad de metodologías de estudio en la intervención de cimentación en el Patrimonio Arquitectónico: el caso del Parador Nacional de Turismo de Carmona (Sevilla)". *INGEOTER*, Vol. 8 (2006), pp. 311-324.

\* \* \*